第 51 卷 第 8 期
2015 年 8 月 第 951-956 页
金属学报
ACTA METALLURGICA SINICA
Vol.51 No.8
Aug. 2015 pp.951-956

单晶DD3与细晶GH4169高温合金摩擦焊接界面表征*

杜随更 王喜锋 高 漫

(西北工业大学现代设计与集成制造技术教育部重点实验室, 西安 710072)

摘 要 采用SEM, TEM及EDS对制造焊接式整体涡轮叶盘所用的单晶DD3与细晶GH4169高温合金摩擦焊接界面进行了研究. 结果表明, 焊合区存在一条以GH4169合金为主的摩擦变形带, 两侧单晶和细晶合金的热力影响区均形成了动态再结晶晶粒; 连接界面处于两侧合金的动态再结晶晶粒之间, 通过连接界面上的共有晶粒和共有晶界实现了两侧合金的连接; 成分过渡主要发生在连接界面处的共有晶粒内和共有晶界处. TEM分析位置的共有晶粒(C2)与相邻GH4169动态再结晶晶粒(C3)具有特殊的取向关系: $[\bar{1}14]_{C2} // [\bar{1}10]_{C3}$ 和 $(220)_{C2} // (220)_{C3}$; 在摩擦焊热循环及焊后热处理作用下, 共有晶粒、两侧动态再结晶晶粒都存在 γ' 相析出, γ' 相呈细小的球形分布, 并与 γ 基体共格, 但未发现有 γ'' 相析出.

关键词 单晶高温合金, 高温合金, 摩擦焊, 连接机理, 共有晶粒

中图法分类号 TG457 **文献标识码** A **文章编号** 0412-1961(2015)08-0951-06

CHARACTERISTICS OF THE FRICTION WELDING INTERFACE BETWEEN SINGLE CRYSTAL SUPERALLOY DD3 AND FINE GRAINED SUPERALLOY GH4169

DU Suigeng, WANG Xifeng, GAO Man

Key Laboratory of Ministry of Education for Contemporary Design and Integrated Manufacturing Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072

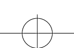
Correspondent: DU Suigeng, professor, Tel: (029)88495264, E-mail: fwcenter@nwpu.edu.cn

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.51175430)

Manuscript received 2014-12-16, in revised form 2015-05-26

ABSTRACT Due to high demand of welded turbine blisk, a fine grain superalloy, GH4169, has been widely used to make the disk and a single crystal superalloy, DD3, has been used for blades. In this work, the joint microstructure and the mechanism of friction welding between the GH4169 and DD3 have been investigated by using the SEM and TEM equipped with EDS. The research results show that there is a friction deformed band of the GH4169 in the weld zone. The heat and mechanical affected zones of the two alloys form dynamic recrystallization grains. The bonding interface is between their dynamic recrystallization grains. The two alloys bond with the common grains and the common grain boundaries. Their compositional change mainly occurs within the common grains and the common grain boundaries at bonding interface. The common grain (C2) at the viewpoint of TEM analysis and adjacent dynamic recrystallization grain (C3) of the GH4169 has a specific orientation relationship, $[\bar{1}14]_{C2} // [\bar{1}10]_{C3}$, $(220)_{C2} // (220)_{C3}$. With the friction welding thermal cycles and post weld heat treatment, the γ' phase precipitates with tiny spherical distribution at the common grain and the two sides of dynamic recrystalliza-

*国家自然科学基金资助项目 51175430
收到初稿日期: 2014-12-16, 收到修改稿日期: 2015-05-26
作者简介: 杜随更, 男, 1963年生, 教授, 博士
DOI: 10.11900/0412.1961.2014.00686



tion grains, and coherent with γ matrix. But no γ'' phase precipitates.

KEY WORDS single crystal, superalloy, friction welding, bonding mechanism, common grain

单晶高温合金和细晶高温合金分别是制造新型航空发动机焊接式整体涡轮叶盘所用叶片和轮盘材料的最佳选择, 焊接式整体涡轮叶盘综合利用了单晶高温合金优异的高温蠕变性能和细晶高温合金的高疲劳性能[1~4]. 采用熔焊的方法焊接这些沉淀强化高温合金时容易产生裂纹, 很难得到满意的焊接接头, 固相焊方法是一种比较好的方法[5~10]. 单晶与细晶异种高温合金的焊接研究起步较晚[11,12], Liu等[13]对DD98单晶及M963多晶镍基高温合金过渡液相(TLP)扩散焊接的连接行为进行了研究, 指出异种合金TLP扩散焊接的等温结晶是一个扩散控制的结晶过程, 经过1190 ℃, 4 h等温结晶, 接头高温持久性能与M963合金相当. Steuer和Singer[14]在247柱状晶镍基高温合金与PWA1483单晶镍基高温合金的TLP扩散焊中添加B镇静剂降低熔点, 发现在比较高的焊接温度, B的加入对接头性能无影响. Liu等[15]进行了DD3单晶与GH4169多晶镍基高温合金TLP扩散焊接研究, 指出焊接接头扩散区宽度约35 μm, 硬度高于DD3单晶合金. 在单晶与细晶高温合金摩擦焊接研究方面, Karadge等[16]研究了单晶取向对CMSX-4单晶高温合金与RR1000细晶高温合金线性摩擦焊接性能的影响, 认为振动方向与单晶合金[110]方向的夹角对焊接性能影响显著. 杜随更等[17~19]对单晶与细晶高温合金的摩擦焊接接头组织、性能及摩擦界面摩擦性能进行了初步研究, 得到了摩擦系数随温度变化方程, 结果表明, 摩擦焊接接头高温持久性能优于单晶母材.

目前, 关于单晶高温合金与细晶高温合金焊接研究主要集中在TLP扩散焊接, 摩擦焊接连接机理尚不清楚. 本工作对叶片材料DD3单晶高温合金和涡轮盘材料GH4169细晶高温合金的摩擦焊接头连接机理与连接界面进行了深入研究.

1 实验方法

实验所用材料为DD3镍基单晶高温合金和细晶GH4169镍铁基高温合金, 2种合金化学成分见表1. 焊接用试样为棒材, 直径为15 mm, DD3合金的[001]方向平行于棒材轴向.

采用C25型连续驱动摩擦焊机进行焊接, 该焊机配备了工业控制计算机闭环控制及数据采集系统, 可对摩擦焊接过程中的各项参数进行实时检测及控制. 主要工艺参数为: 摩擦压力90 MPa, 顶锻压力150 MPa, 焊接时间9 s, 主轴转速1250 r/min. 焊后热处理规范为(600±2) ℃, 8 h, 炉冷.

焊接接头金相试样腐蚀液采用20 mL HCl+20 mL C_2H_5OH+4 g $CuSO_4$, 腐蚀时间30~45 s, 透射电镜薄膜试样采用离子减薄的方法制备. 采用Quanta 400 (配备Oxford INCA能谱系统)场发射扫描电子显微镜(SEM)和Tecnai G^2 F30 (配备EDAX能谱系统)场发射透射电子显微镜(TEM)观察和分析接头组织、物相、晶粒取向及焊合区成分.

2 实验结果及讨论

2.1 焊合区SEM分析

图1为DD3与GH4169合金摩擦焊接焊合区SEM像. 可以看出, 在焊接面靠近轴线位置出现了一条宽约6 μm的易腐蚀区(图1a和b), 其上可观察到许多白色颗粒. 这些白色颗粒分布在晶界及晶粒内部(图1c), 主要在GH4169合金一侧, 其具体成分与结构有待进一步分析. 该区左右两侧分别为DD3和GH4169合金. 在焊接过程中, 该区域内发生了剧烈的塑性变形, 塑性变形与动态再结晶(DRX)同时进行, 形成了细小的动态再结晶晶粒, 因变形内能较高, 相对于再结晶充分的大晶粒组织更易腐蚀, 因此可认为该易腐蚀区为摩擦变形带. 由于在旋转摩擦焊接过程中摩擦变形带发生的扭转、剪切塑性变形程度及温度不同, 所以摩擦变形带沿径向呈现不同的形貌. 图1a和b为焊接面靠近工件轴线部分, 图1c和d为靠近圆柱面部分.

SEM/EDS线扫描结果表明, 摩擦变形带主要由

表1 实验用合金的化学成分

Table 1 Chemical compositions of tested alloys

(mass fraction / %)

Alloy	C	Cr	Co	Mo	W	Al	Ti	Fe	Nb	Ni
DD3	–	9.5	5	3.8	5.2	5.9	2.1	–	–	Bal.
GH4169	0.04	19	–	3.0	–	0.5	1.0	18.5	5.1	Bal.

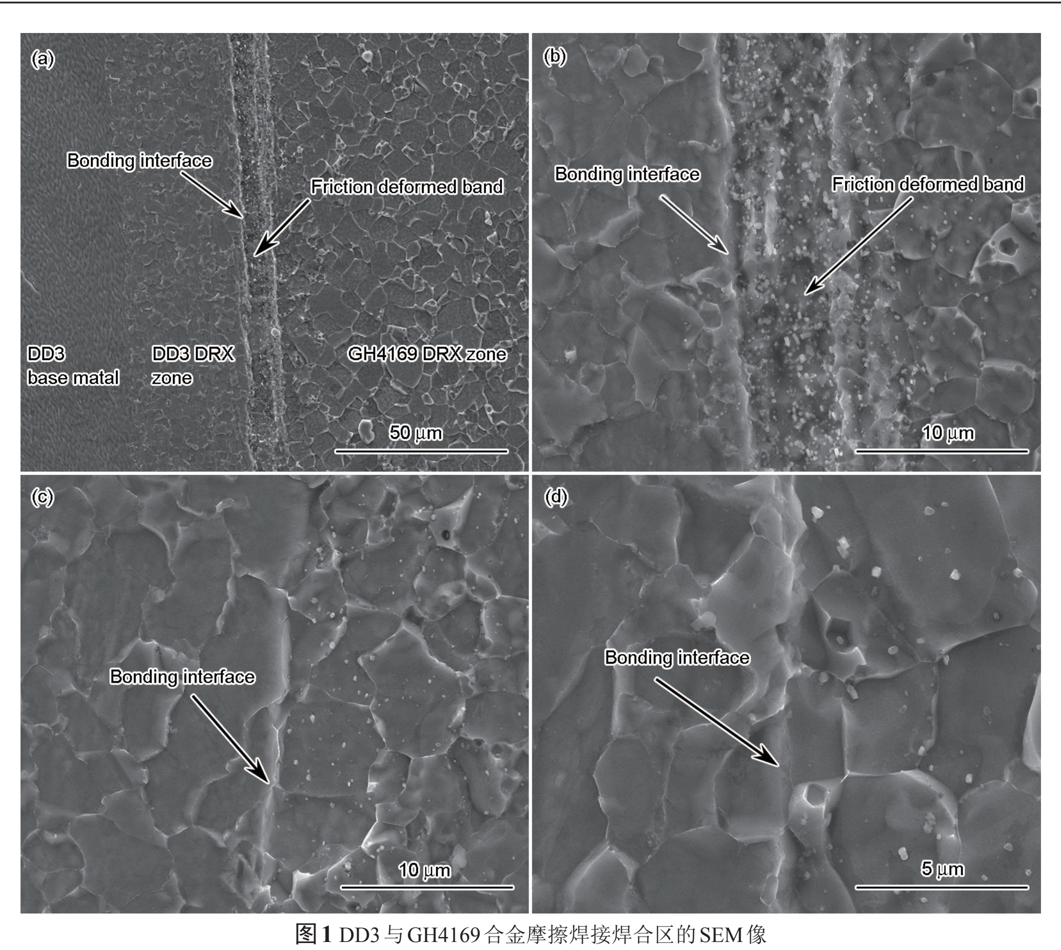


图1 DD3与GH4169合金摩擦焊接焊合区的SEM像

Fig.1 SEM images of the welding zone of DD3 and GH4169 friction welding joint (DRX—dynamic recrystallization)

(a, b) near axis　(c, d) near cylindrical surface

GH4169合金构成. 在摩擦焊接过程中, 摩擦界面温度约为1200 ℃, 在此温度下, DD3合金强度高于GH4169合金[20], 因此, 摩擦焊接过程中两侧合金的相对剪切变形主要集中在以GH4169合金为主的摩擦变形带上, 使其产生了剧烈塑性变形, 形成了细小的动态再结晶晶粒.

镍基单晶高温合金在达到一定的变形量和变形温度时会发生γ'相的固溶, 有利于促进DRX形核[21~23]. 在摩擦焊接过程中, 由于热、力耦合的作用, DD3合金一侧的近摩擦变形带区发生剧烈塑性变形, 变形区温度急剧上升, γ'相回溶, 产生了动态再结晶. 再结晶区域宽约30 μm, 晶界弯曲, 晶粒大小不一.

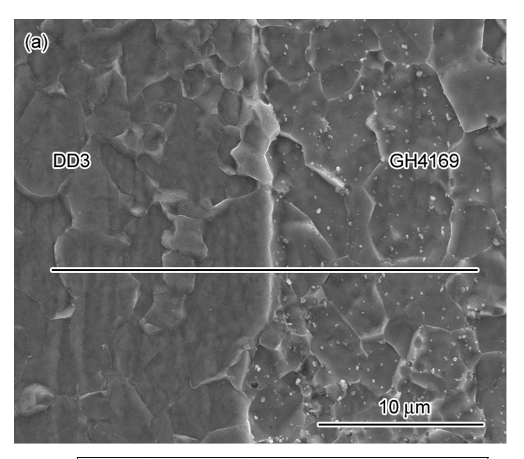
摩擦带右侧区域的GH4169合金形成了典型的DRX组织. 因为靠近摩擦带的区域塑性变形大、温度高, 因此晶粒长大较充分, 晶界较平直, 界线分明, 晶粒呈多边形, 大小较均匀, 直径约为3 μm.

DD3动态再结晶区与GH4169摩擦变形带之间有一条较为明显的分界线(连接界面). 在摩擦加热和顶锻变形动态再结晶过程及保压冷却静态再结晶过程中, 两侧的再结晶晶粒都会分别向对方长大, 部分区域形成了共有晶粒, 部分区域晶界和连接界面重合, 形成共有晶界. 从图1d可以看出, 在界面处一个共有晶粒内部仍有明显的分界线(连接界面), 晶粒左侧属于DD3合金, 右侧属于GH4169合金.

对连接界面上的共有晶粒和共有晶界进行成分线扫描分析, 结果表明, 连接界面处合金元素成分变化梯度大, 无论连接界面在共有晶界处, 还是在共有晶粒内, 如图2和3所示. 共有晶粒内可以形成成分差异较大的两部分, 这两部分以连接界面为界, 两侧成分与相应的母材成分基本一致. 共有晶粒内连接界面两侧晶体结构的异同有待进一步分析.

2.2 焊合区TEM分析

2.2.1 焊合区TEM/EDS分析　图4a为DD3与GH4169摩擦焊接接头焊合区一处TEM像, 左侧为DD3合金, 右侧为GH4169合金. 对图4a中的C1~C4晶粒进行成分线扫描, 长度为4.065 μm, 共100个点, 结果如图4b所示. GH4169是Ni-Cr-Fe基高温合金, 而DD3是镍基高温合金, GH4169合金的Ni含量低、Cr含量高, 含Fe和Nb. 从图4b可见, 合



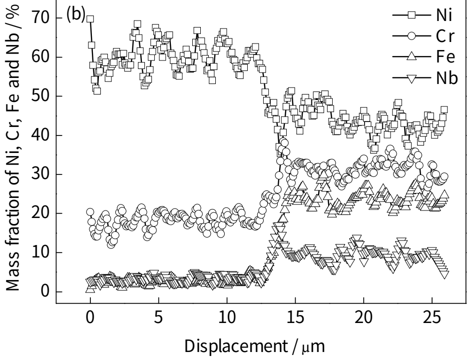
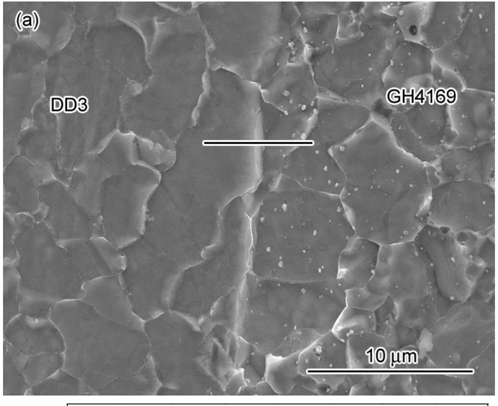


图2 DD3与GH4169合金摩擦焊接焊合区共有晶界SEM像及EDS分析

Fig.2 SEM image (a) and EDS analysis (b) of common grain boundary in weld zone of DD3 and GH4169 friction welding



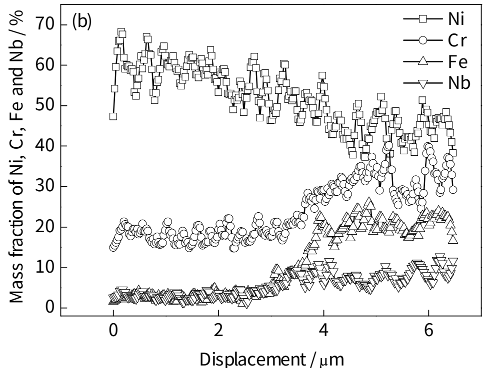
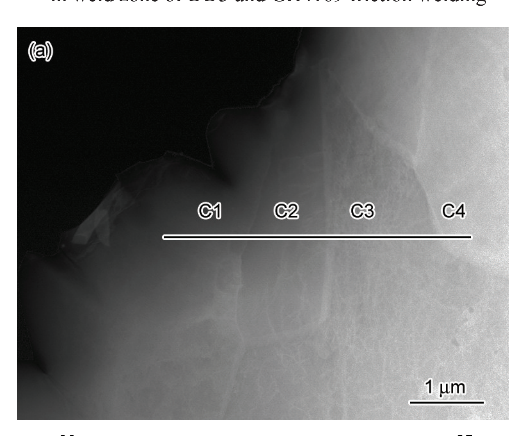


图3 DD3与GH4169合金摩擦焊接焊合区共有晶粒SEM像及EDS分析

Fig.3 SEM image (a) and EDS analysis (b) of common grain in weld zone of DD3 and GH4169 friction welding

金元素含量主要在C2晶粒内发生连续过渡, 在C1, C3和C4晶粒内基本不变. 在晶粒C2内部, Ni含量逐渐降低, Fe, Cr及Nb含量逐渐升高. 这说明: C2是2种合金的共有晶粒,晶粒C1为DD3再结晶晶粒, 晶粒C3及C4为GH4169再结晶晶粒, 该处两侧合金元素发生相互扩散的范围主要在共有晶粒内.

2.2.2 焊合区TEM/SAED分析 进一步对图4中DD3与GH4169合金摩擦焊接接头焊合区中的C1, C2和C3晶粒进行TEM/SAED分析, 结果如图5所示. C1 (图5b), C2 (图5c)和C3 (图5d)晶粒的选区电子衍射谱表明, 3个晶粒均由γ+γ'相组成, C2晶粒的γ'相中心暗场像见图5f. γ'-Ni_3(Al, Ti, Nb)相为fcc-$L1_2$结构, Al原子位于fcc点阵的顶点位置, Ni原子位于面心位置, 点阵常数a≈0.3590 nm, γ'相的点阵常数与γ基体相近, 一般相差不超过1%, γ'相沿基体的{100}面析出, 并与基体共格[24]. γ'相呈小球状, 在基体里弥散分布. GH4169合金在直接时效(DA)状态下以γ为基体, 主要强化相为γ''-Ni_3Nb, 并含一定量的γ'-Ni_3(Al, Ti, Nb)辅助强化[25]. C3晶粒属于GH4169合金, 但没有发现γ''相衍射斑点(图5d),



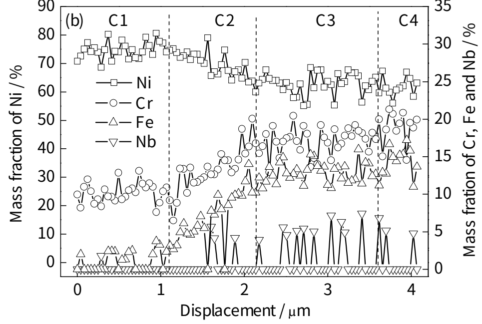


图4 DD3与GH4169合金摩擦焊接焊合区的TEM像及EDS分析

Fig.4 TEM image (a) and EDS analysis of areas C1~C4 in Fig.4a (b) in weld zone of DD3 and GH4169 friction welding

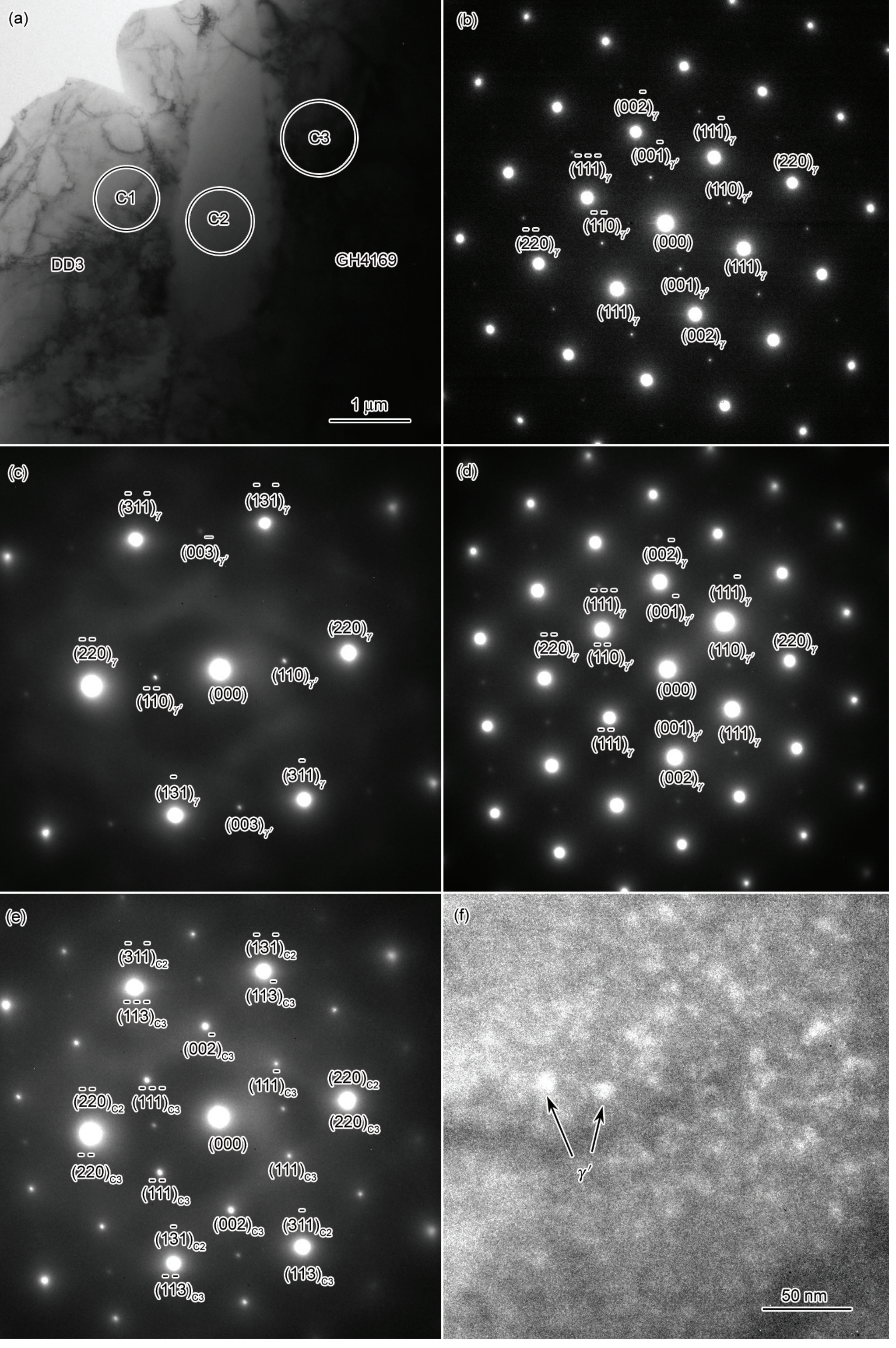


图 5 DD3 与 GH4169 合金摩擦焊接焊合区 TEM/SAED 分析

Fig.5 TEM image (a) and SAED analysis of grains C1 ([*uvw*]=$[\bar{1}10]$) (b), C2 ([*uvw*]=$[\bar{1}14]$) (c) and C3 ([*uvw*]=$[\bar{1}10]$) (d) in Fig.5a, composite SAED pattern of C2 and C3 (e) and center dark field image of γ' phase (f)

说明在摩擦焊热循环下, γ'' 相发生了固溶, 焊后冷却及热处理过程中并没有重新析出 γ'' 相.

2.3 取向关系分析

为确定共有晶粒与 DD3 合金再结晶晶粒及 GH4169 合金再结晶晶粒间的取向关系, 用选区电子衍射方法进一步对 C2-C1 晶粒、C2-C3 晶粒进行双晶衍射测试. 选区电子衍射花样分析结果显示, 晶粒 C1-C2 没有发现特殊的取向关系, 而 C2 与 C3

之间具有特殊的取向关系(图5e). 测试过程中, 先对晶粒C2做选区衍射, 然后对C2-C3界面处做选区衍射, 在这个过程中电子束方向不变, 试样也没有转动. 经标定计算, 一套斑点对应晶粒C2 (对比C2单独的衍射斑点图5c), 晶带轴为$[uvw]_{C2}=[\bar{1}14]$, 一套斑点为晶粒C3 (对比C3单独的衍射斑点图5d), 晶带轴为$[uvw]_{C3}=[\bar{1}10]$. 即两晶粒具有晶向平行关系 $[\bar{1}14]_{C2} // [\bar{1}10]_{C3}$. 同时 ***R*** 矢量在同一方向上有重合斑点$(220)_{C2}$及$(220)_{C3}$, 表明晶面具有平行关系$(220)_{C2}//(220)_{C3}$, 即C2与C3晶粒基体取向存在如下关系: $[\bar{1}14]_{C2} // [\bar{1}10]_{C3}$, $(220)_{C2}//(220)_{C3}$.

3 结论

(1) 单晶DD3与细晶GH4169高温合金摩擦焊接头焊合区存在一条以GH4169合金为主的摩擦变形带, 单晶和细晶高温合金的热力影响区都发生了动态再结晶.

(2) 单晶DD3与细晶GH4169高温合金连接界面处于两侧合金的动态再结晶晶粒之间, 通过共有晶粒和共有晶界实现了两侧合金的连接. 连接界面处两侧合金元素成分变化梯度大.

(3) 所分析位置的共有晶粒与GH4169合金动态再结晶晶粒具有特殊取向关系, $[\bar{1}14]_{C2} // [\bar{1}10]_{C3}$, $(220)_{C2}//(220)_{C3}$.

(4) 在摩擦焊热循环及焊后热处理作用后, 共有晶粒、两侧动态再结晶晶粒都存在γ'相析出, γ'相呈细小的球形分布, 并与γ基体共格, 但未发现有γ''相析出.

参考文献

[1] Pollock T M, Tin S. *J Propul Power*, 2006; 22: 361

[2] Huang C F. *Aero Manuf Technol*, 2006; (4): 94
(黄春峰. 航空制造技术, 2006; (4): 94)

[3] Yilmaz O, Gindy N, Gao J. *Rob Comput-Integrated Manuf*, 2010; 26: 190

[4] Mateo A. *Revista Metalurgia*, 2014; 50(3): e023

[5] Preuss M, Withers P J, Baxter G J. *Mater Sci Eng*, 2006; A437: 38

[6] Schnell A, Hoebel M, Samuleson J. *Adv Mater Res*, 2011; 278: 434

[7] Henderson M B, Arrell D, Larsson R, Heobel M, Marchant G. *Sci Technol Weld Joining*, 2004; 9: 13

[8] Damodaram R, Raman S G S, Rao K P. *Mater Sci Eng*, 2013; A560: 781

[9] Bhamji I, Preuss M, Threadgill P L, Addison A C. *Mater Sci Technol*, 2011; 27: 2

[10] Moosavy H N, Aboutalebi M, Seyedein S H. *J Mater Process Technol*, 2012; 212: 2210

[11] Chamanfar A, Jahazi M, Cormier J. *Metall Mater Trans*, 2015; 46A: 1

[12] Ojo O A. *J Mater Sci*, 2012; 47: 1598

[13] Liu J D, Jin T, Zhao N R, Wang Z H, Sun X F, Guan H R, Hu Z Q. *Sci Technol Weld Joining*, 2010; 15: 194

[14] Steuer S, Singer R F. *Metall Mater Trans*, 2014; 45A: 3545

[15] Liu J, Cao J, Lin X, Song X, Feng J. *Mater Des*, 2013; 49: 622

[16] Karadge M, Preuss M, Withers P J, Bray S. *Mater Sci Eng*, 2008; A491: 446

[17] Du S G, Fu L, Wang Z P. *J Northwest Polytech Univ*, 2003; 21: 136
(杜随更, 傅 莉, 王忠平. 西北工业大学学报, 2003; 21: 136)

[18] Du S G, Wang Q, Fu L. *Trans Chin Weld Ins*, 2002; 23(4): 27
(杜随更, 王 庆, 傅 莉. 焊接学报, 2002; 23(4): 27)

[19] Du S G, Wang X F, Wang J W, Jiang Z. *Trans Chin Weld Ins*, 2014; 35(6): 13
(杜随更, 王喜锋, 王晋伟, 姜 哲. 焊接学报, 2014; 35(6): 13)

[20] China Aeronautical Materials Handbook Editorial Committee. *China Aeronautical Materials Handbook*. Vol.2, Beijing: China Standard Press, 2002: 842
(中国航空材料手册编辑委员会. 中国航空材料手册. 第2卷, 北京: 中国标准出版社, 2002: 842)

[21] Xiong J C, Li J R, Zhao J Q, Liu S Z, Dong J X. *Acta Metall Sin*, 2009; 45: 1232
(熊继春, 李嘉荣, 赵金乾, 刘世忠, 董建新. 金属学报, 2009; 45: 1232)

[22] Wu C L, Xu Q Y, Xiong J C, Li Z L, Li J R, Liu B C. *Acta Metall Sin*, 2013; 49: 523
(吴春龙, 许庆彦, 熊继春, 李忠林, 李嘉荣, 柳百成. 金属学报, 2013; 49: 523)

[23] Chen X, Lin Y C, Wen D, Zhang J, He M. *Mater Des*, 2014; 57: 568

[24] Geddes B, Leon H, Huang X. *Superalloys: Alloying and Performance*. Materials Park, Ohio: ASM International, 2010: 10

[25] Xie X S, Dong J X, Fu S H, Zhang M C. *Acta Metall Sin*, 2010; 46: 1289
(谢锡善, 董建新, 付书红, 张麦仓. 金属学报, 2010; 46: 1289)

(责任编辑:肖素红)